

二维艾里光束的自愈特性

杨斌 覃亚丽 刘鲜 任宏亮 薛林林

浙江工业大学信息工程学院光纤通信与信息工程研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 通过数值仿真研究了不同区域被阻挡时无衍射二维艾里光束的自愈特性。仿真结果表明,部分区域被阻挡时,光束在传输一定距离后能进行自我重构。同时研究了高斯噪声环境下无衍射二维艾里光束的自愈特性。结果显示,在一定的信噪比下艾里光束经过一定距离的传输后也能够自愈。这种自愈具有一定的稳健性。艾里光束的自愈特性能够应用于光镊系统、微粒自陷和操控、光无线通信等众多领域。

关键词 衍射; 艾里光束; 自愈特性; 数值仿真

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.070501

Self-Healing Property of Two-Dimensional Airy Beams

Yang Bin Qin Yali Liu Xian Ren Hongliang Xue Linlin

*Institute of Fiber Optic Communication and Information Engineering, College of Information Engineering,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China*

Abstract The self-healing property of non-diffracting two-dimensional Airy beams with different parts blocked is investigated via numerical simulation. The simulation shows that the Airy beams that are partially blocked can be self-reconstructed after propagating for a certain distance. The self-healing property under the Gaussian noise perturbation is also investigated. The result shows that self-healing of the Airy beams can be realized after the beam propagates for a certain distance when the signal-to-noise ratio is appropriate. The self-healing property of Airy beams is robust, and the property can be applied in many fields such as optical tweezer system, atom trapping and manipulating, and wireless optical communications.

Key words diffraction; Airy beams; self-healing property; numerical simulation

OCIS codes 050.1940; 080.1510; 160.4760; 140.3460

1 引言

无衍射光束是一种能够在传输过程中保持不变的局域光波包,其中众所周知的贝塞尔光束已经从理论和实验角度得到了验证。在量子物理领域,Berry等^[1]首先从理论上推导出薛定谔方程具有无衍射的艾里波包解,由于艾里光束具有无限能量,因此不能进行实际验证和应用。2007年,Siviloglou等^[2]首次推导出能量指数截断的艾里光束同样是薛定谔方程的解,并且通过实验验证了艾里光束的无衍射特性^[3],为研究艾里光束提供了可能。

艾里光束具有三大特性,即无衍射特性、自加速特性和自愈特性。无衍射特性表现为光束在自由空间传输过程中,光束的形状保持不变;自加速特性是其特有的,在传输过程中艾里光束会有横向自加速现象^[4];自愈特性则表现为在传输过程中遇到障碍物阻挡时,光束通过障碍后仍能重构并进行传输。艾里光束的特性在近年来被广泛研究,并应用于微粒子操纵^[5]、等离子体通道的产生^[6]、真空电子束加速^[7]、艾里激光器^[8]等

收稿日期: 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-01; **网络出版日期:** 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61275124, 61405178, 61205121)

作者简介: 杨斌(1991—),男,硕士研究生,主要从事光孤子及非线性光学方面的研究。E-mail: 826882580@qq.com

导师简介: 覃亚丽(1963—),女,博士,教授,主要从事光孤子及非线性光学、微波通信及电磁计算、信号处理等方面的研究。E-mail: ylqin@zjut.edu.cn(通信联系人)

众多研究领域。

本文主要通过交替隐式差分算法数值仿真研究了二维艾里光束的特性。在自由空间中传输时,有限能量的艾里光束在传输方向上保持形状不变,具有很好的无衍射特性,此外,在横轴方向,由于存在横向自加速,光束会沿着 x - y 平面内特定的角度进行自加速。主要研究了二维艾里光束的自愈特性。通过改变阻挡物位置阻挡光束的不同区域,传输一定距离后,艾里光束能够自行恢复并沿着原传输方向传输。只有主瓣的情况下主瓣会展宽,没有发生自愈。引入高斯噪声后,二维艾里光束仍能实现自愈,说明艾里光束的自愈具有一定的稳健性。

2 二维艾里光束的动态特性

为了分析二维艾里光束的传输动态特性,可用归一化衍射旁轴方程描述为^[9]

$$i \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{2k} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

式中 U 为电场包络, $k = 2\pi n/\lambda_0$ 为光的波数,通过求解(1)式可得二维艾里光束的波包解为

$$U(x, y) = f_{\text{Ai}}(x) f_{\text{Ai}}(y), \quad (2)$$

式中 $f_{\text{Ai}}(x)$ 、 $f_{\text{Ai}}(y)$ 为艾里函数。(2)式得到的是无限能量的艾里光束波包的表达式,该表达式无法在实际应用中得到。通过引入孔径截断函数,可以得到有限能量的二维艾里光束解,并且满足(1)式。因此可得

$$U(x, y, z=0) = f_{\text{Ai}}(x) f_{\text{Ai}}(y) \exp(ax) \exp(ay), \quad (3)$$

式中 a 为截断参数 ($0 \leq a \leq 1$),当 $a \ll 1$ 时,(3)式可用(2)式表示。将(3)式作为输入光束进行数值分析,求解方程可得传输过程中的电场包络为

$$U(x, y, z) = \prod_{m=x, y} U(s_m, \xi_m), \quad (4)$$

$$U(s_m, \xi_m) = f_{\text{Ai}} [s_m - (\xi_m/2)^2 + ia\xi_m] \times \exp(as_m - a\xi_m^2/2) \times \exp\{i[-(\xi_m^3/12)] + [(a^2 + s_m)\xi_m/2]\}, \quad (5)$$

式中 $s_x = x/x_0$ 和 $s_y = y/y_0$ 分别表示无量纲的横坐标, x_0 和 y_0 为任意横向尺度;对传输距离也进行归一化, $\xi_x = z/kx_0^2$, $\xi_y = z/ky_0^2$ 。取艾里光束的波长为 $0.5 \mu\text{m}$, $x_0 = y_0 = 50 \mu\text{m}$ 时, $\xi = 1$ 对应传输距离为 31.4 mm 。当 $a=0$ 时即可得到无限能量二维艾里光束的动态传输特性。

图 1(a)、(b)分别为无限能量和有限能量二维艾里光束在入射时($z=0$)的能量分布情况。可以看出,光束的绝大部分能量集中于主瓣区域。图 1(b)中 $a=0.1$,与无限能量的情况相比,有限能量艾里光束的旁瓣衰减得更快,下文中光束均为有限能量的二维艾里光束。图 1(c)、(d)分别为光束对应的 3D 图,可以看出当 x_0 和 y_0 相同时,光束分布关于 x - y 平面的 45° 对角线对称。对有限能量艾里光束进行傅里叶变换求出傅里叶频谱,发现其波包功率谱是具有立方相位因子的高斯分布,这一结果表明对高斯光束进行立方相位调制、再进行傅里叶变换即可得到艾里光束。因此在实际应用中可通过空间光调制器将立方相位调制在高斯光束上,透过傅里叶透镜后,调制后的光束进行傅里叶变换,在透镜的焦平面处可得到有限能量的艾里光束^[10]。此外,Ellenbogen 等^[11]发现了基于二次非线性光子晶体产生艾里光束的方法, Ren 等^[12]用聚合物和液晶得

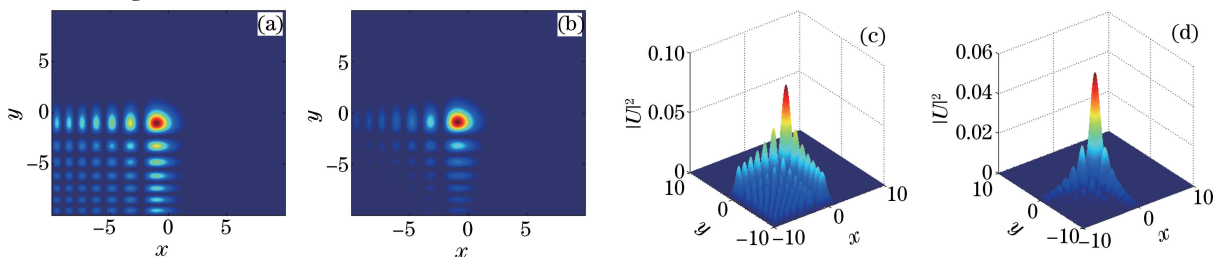


图 1 (a) 无限能量二维艾里光束能量分布; (b) 有限能量二维艾里光束能量分布; (c) 图 1(a)对应的 3D 图; (d) 图 1(b)对应的 3D 图

Fig. 1 (a) Energy distribution of 2D Airy beam with infinite energy; (b) energy distribution of 2D Airy beam with finite energy; (c) 3D pattern corresponding to Fig. 1(a); (d) 3D pattern corresponding to Fig. 1(b)

到了基于二进制相位图的高分子分散液晶产生艾里光束的方法,这为研究艾里光束提供了便利。

二维艾里光束在传输时,(5)式中 $(\xi_m/2)^2$ 描述了其横平面上的自加速轨迹。传输距离 $\xi=0, 1.4, 2.8$ 时,二维艾里光束在自由空间传输的动态特性如图2所示。

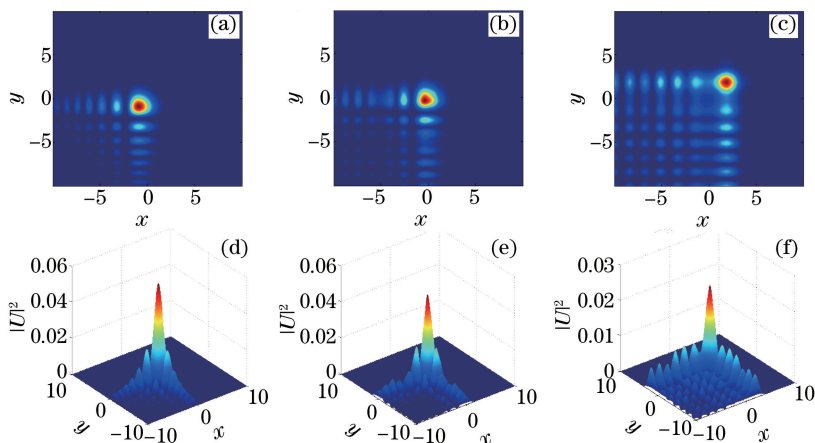


图2 二维艾里光束在自由空间传输的动态特性。(a) $\xi=0$; (b) $\xi=1.2$; (c) $\xi=2.4$;
(d)(e)(f) 分别对应图2(a)、(b)、(c)的3D图

Fig. 2 Dynamical properties of 2D Airy beam in free space. (a) $\xi=0$; (b) $\xi=1.2$; (c) $\xi=2.4$;
(d)(e)(f) 3D patterns corresponding to Figs. 2(a), 2(b), and 2(c), respectively

令 $x_0=y_0=50\ \mu\text{m}$,在横向平面上光束沿着 x - y 平面对角线方向传输。可以看出,随着光束沿 z 轴方向进行传输,其在横平面上也发生偏移,这就是自加速特性。此外,在传输过程中艾里光束的形状基本保持不变。

3 二维艾里光束的自愈特性

无衍射艾里光束的自愈特性可由Babinet准则解释^[13]。本文通过部分阻挡艾里光束研究其自愈特性^[14]。由图1(a)可知,二维艾里光束的大部分能量集中于主瓣区域,因此首先研究主瓣被遮挡时二维艾里光束的自愈情况。

如图3所示,二维艾里光束的主瓣区域被阻挡,通过交替隐式差分算法对光束的传输进行数值仿真,图3(a)为入射光束主瓣被完全遮挡。图3(b)~(f)分别表示传输距离间隔0.4时艾里光束的能量分布情况。

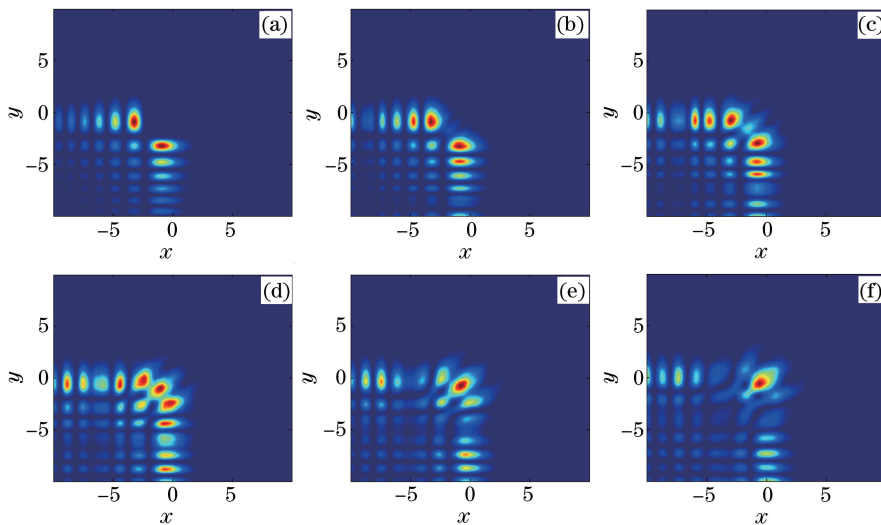


图3 主瓣被遮挡时二维艾里光束的自愈动态特性。(a) $\xi=0$; (b) $\xi=0.4$; (c) $\xi=0.8$; (d) $\xi=1.2$; (e) $\xi=1.6$; (f) $\xi=2.0$

Fig. 3 Self-healing dynamics of 2D Airy beam with the main lobe blocked. (a) $\xi=0$; (b) $\xi=0.4$; (c) $\xi=0.8$;

(d) $\xi=1.2$; (e) $\xi=1.6$; (f) $\xi=2.0$

可以看到随着传输距离 ξ 的增加,被遮挡的主瓣区域正在进行自我重构。旁瓣的能量从周围区域向主瓣阻挡区域流动,当 $\xi = 1.2$ 时,主瓣已恢复[图 3(d)],其强度分布几乎与未遮挡时一致。光束继续传输时,可以看到光束沿 45° 对角线有横向自加速。

主瓣集中了光束的大部分能量,被遮挡后自愈效果明显,阻挡艾里光束的内部区域,入射光束如图 4(a) 所示。图 4(b)~(h) 分别表示传输距离间隔 0.4 时艾里光束的能量分布情况,图 4(i) 为未遮挡时的初始光束,可以看到经过一定距离的传输后,被阻挡区域得到恢复,证明光束的内部区域同样具有自愈能力。

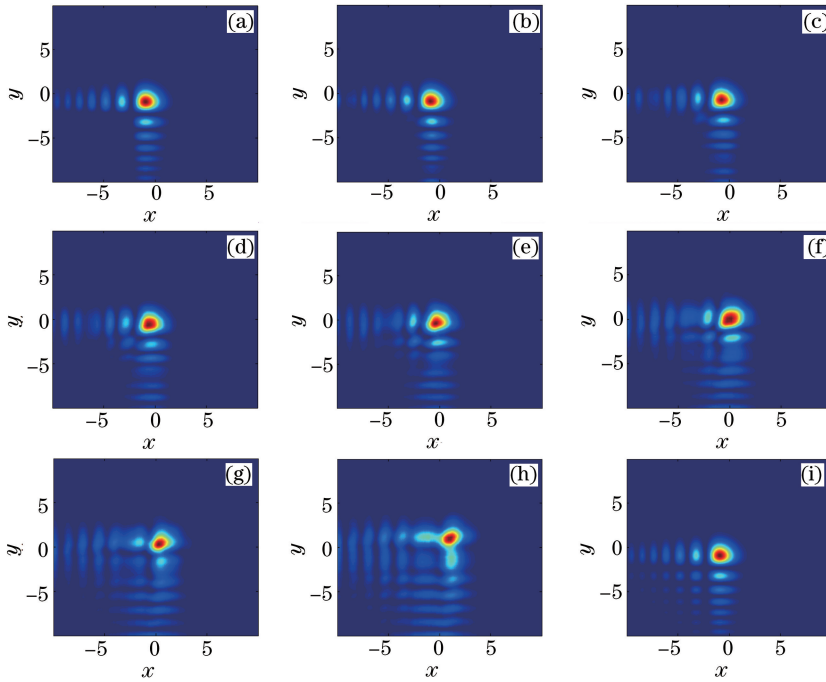


图 4 艾里光束内部区域被遮挡时二维艾里光束的自愈动态特性。(a) $\xi=0$; (b) $\xi=0.4$; (c) $\xi=0.8$; (d) $\xi=1.2$; (e) $\xi=1.6$; (f) $\xi=2.0$; (g) $\xi=2.4$; (h) $\xi=2.8$; (i) 未遮挡时的初始光束

Fig. 4 Self-healing dynamics of 2D Airy beam with two arbitrary parts blocked. (a) $\xi=0$; (b) $\xi=0.4$; (c) $\xi=0.8$; (d) $\xi=1.2$; (e) $\xi=1.6$; (f) $\xi=2.0$; (g) $\xi=2.4$; (h) $\xi=2.8$; (i) initial beam not blocked

上述两种情况均为二维艾里光束在自由空间中的传输,艾里光束的自愈能力很强,从能量分布上来看光束实现自愈,但光束能量有所减小。考察存在环境噪声干扰时艾里光束的自愈能力。引入高斯噪声,设定其信噪比为 20 dB。图 5 所示为噪声环境下主瓣被阻挡时二维艾里光束的自愈特性。图 5(a) 为初始入射光束,图 5(b)~(f) 分别对应传输距离间隔 0.4 时的强度分布,可以看出在噪声环境下主瓣被阻挡的艾里光束仍能自愈,说明艾里光束的自愈具有一定的稳健性。与自由空间中传输的情况相比,噪声的引入使得艾里光束的自愈能力下降。在无序混浊介质和湍流介质等极端环境中,艾里光束的自愈特性将在通信领域具有巨大的潜能,国内学者已通过理论和实验验证了携带图像信号的艾里光束在主瓣被阻挡时,经过传输后仍能从自愈后的艾里光束中得到轮廓清晰的图像信号^[15-17]。

对不同噪声水平下艾里光束的自愈效果进行仿真,结果如图 6 所示,图 6(a)~(c) 分别为信噪比为 30 dB、20 dB、10 dB,传输距离 $\xi = 2.0$ 时艾里光束的自愈情况。不难发现,随着噪声强度增强,自愈效果减弱。当信噪比为 0 dB 时,艾里光束很难完成自愈。

最后,将二维艾里光束的其余部分全部遮挡,只剩下能量最高的主瓣,可以发现随着传输距离的增加,主瓣不断展开,能量不断减小,并沿着对角线方向横向自加速,没有发生自愈,如图 7 所示。艾里光束的大部分能量都集中在主瓣区域,旁瓣和中间区域的能量较小,通过仿真结果可以看出,当艾里光束的大部分能量被遮挡时,其自愈效果更好,该现象符合 Babinet 准则。

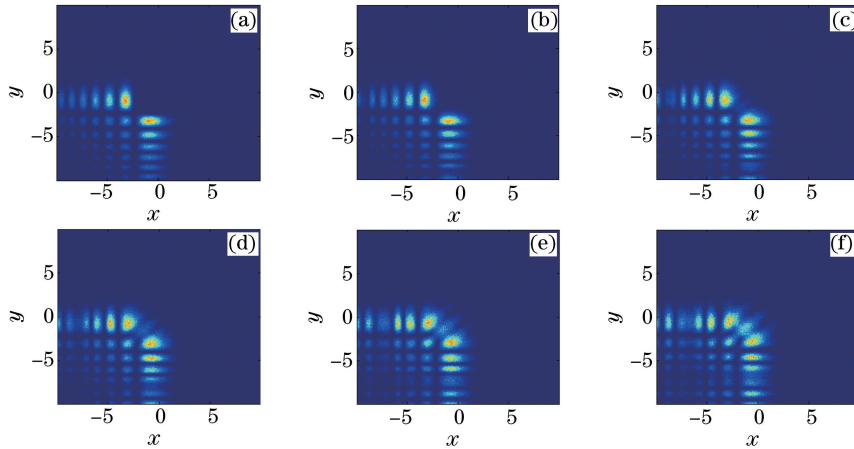


图 5 在高斯噪声环境中主瓣被遮挡时二维艾里光束的自愈动态特性。(a) $\xi=0$; (b) $\xi=0.4$; (c) $\xi=0.8$; (d) $\xi=1.2$; (e) $\xi=1.6$; (f) $\xi=2.0$

Fig. 5 Self-healing dynamics of 2D Airy beam with the main lobe blocked under Gaussian noise perturbation.

(a) $\xi=0$; (b) $\xi=0.4$; (c) $\xi=0.8$; (d) $\xi=1.2$; (e) $\xi=1.6$; (f) $\xi=2.0$

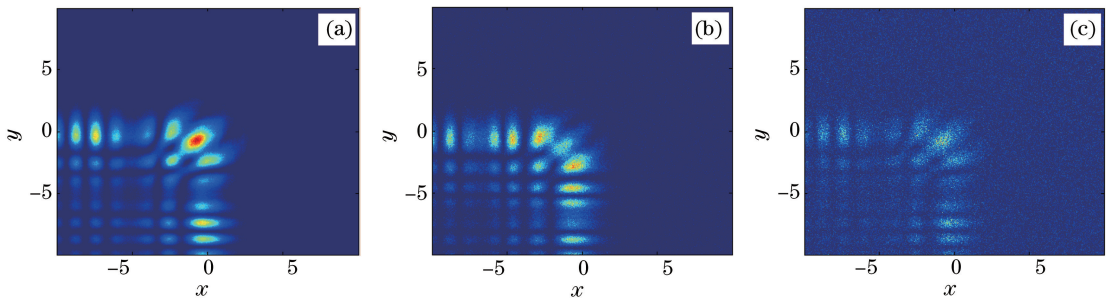


图 6 $\xi=2.0$ 时不同信噪比条件下艾里光束的自愈效果。(a) 30 dB; (b) 20 dB; (c) 10 dB

Fig. 6 Self-healing results at different signal to noise ratios while $\xi=2.0$. (a) 30 dB; (b) 20 dB; (c) 10 dB

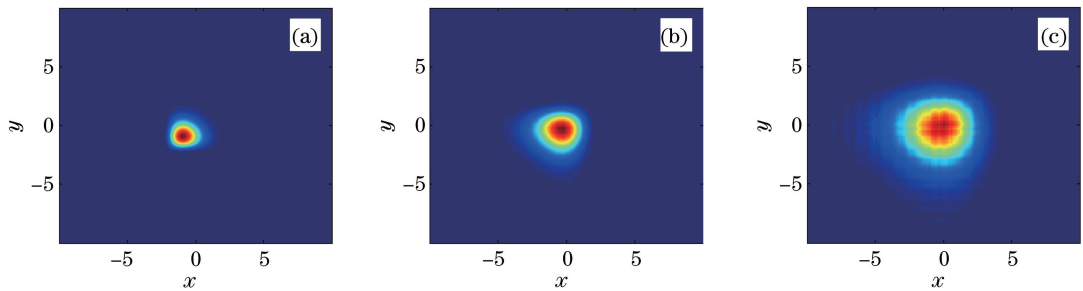


图 7 其余部分被阻挡时主瓣的传输图样。(a) $\xi=0$; (b) $\xi=1.2$; (c) $\xi=2.4$

Fig. 7 Propagation patterns of the main lobe while other parts are blocked. (a) $\xi=0$; (b) $\xi=1.2$; (c) $\xi=2.4$

4 结 论

通过数值仿真研究了二维艾里光束的传输特性,主要研究了艾里光束被障碍物阻挡情况下的自愈特性。二维艾里光束的大部分能量主要集中在主瓣区域,首先将主瓣遮挡,经过一段距离传输后,光束进行了自我重构,其强度分布和无遮挡时一致,在横向平面上,由于存在横向自加速,光束沿着 x - y 平面的对角线方向移动。光束内部区域被遮挡时,经过传输后仍能自愈,自愈速率比主瓣被遮挡时慢。最后引入高斯噪声,在噪声环境下,信噪比为 20 dB 的二维艾里光束在主瓣被遮挡时也能自愈。今后的工作将研究艾里光束被遮挡时能量、信噪比与自愈距离的关系。艾里光束的自愈特性具有潜在的应用价值,可应用于光无线通信、生物工程等领域。

参 考 文 献

- 1 Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. American Journal of Physics, 1979, 47(3): 264-267.
- 2 Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 979-981.
- 3 Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.*. Observation of accelerating Airy beams[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- 4 Cheng Zhen, Chu Xingchun, Zhao Shanghong, *et al.*. Research progress of Airy beam's propagation trajectory control [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060002.
程 振, 楚兴春, 赵尚弘, 等. 艾里光束传输轨迹控制方法的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060002.
- 5 Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. Nature Photonics, 2008, 2(11): 675-678.
- 6 Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.*. Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. Science, 2009, 324(5924): 229-232.
- 7 Li J X, Zang W P, Tian J G. Vacuum laser-driven acceleration by Airy beams[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7300-7306.
- 8 Longhi S. Airy beams from a microchip laser[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 716-718.
- 9 Siviloglou G V, Broky J, Dogariu A, *et al.*. Ballistic dynamics of Airy beams[J]. Optics Letters, 2008, 33(3): 207-209.
- 10 Wang Xiaozhang. Research on generation of Airy beams and propagation controlled by using spatial light modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王晓章. 基于相位空间光调制器的艾里光束产生和传输控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- 11 Ellenbogen T, Voloch N, Ganany-Padowicz A, *et al.*. Nonlinear generation and manipulation of Airy beams[J]. Nature Photonics, 2009, 3(7): 395-398.
- 12 Ren H W, Lin Y H, Fan Y H, *et al.*. Polarization-independent phase modulation using polymer-dispersed liquid crystals [J]. Applied Physical Letters, 2005, 86(14): 141110.
- 13 Bouchal Z, Wagner J, Chlup M. Self-reconstruction of a distorted nondiffracting beam [J]. Optics Communications, 1998, 151(4-6): 207-211.
- 14 Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, *et al.*. Self-healing properties of optical Airy beams[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12880-12891.
- 15 Wang Xiaozhang, Li Qi, Zhong Wen, *et al.*. Drift behavior of Airy beams in turbulence simulated by using a liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213001.
王晓章, 李 琦, 钟 文, 等. 液晶空间光调制器模拟艾里光束在湍流中的漂移 [J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213001.
- 16 Liang Yi. Nonlinear propagations of weak-light and their applications[D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
梁 毅. 弱光非线性传播及应用[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- 17 Wang Xiaozhang, Tang Feng, Yuan Mengjie, *et al.*. Experimental simulation of circular-Airy beam drift in atmospheric turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0813001.
王晓章, 唐 峰, 原劭捷, 等. 实验模拟环形艾里光束在大气扰动中的光束漂移 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0813001.